



Universidad
de Alcalá



Universidad
Rey Juan Carlos

Consecuencias de la descongelación del permafrost por el aumento de la temperatura global en el medio socioeconómico y ambiental

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

Presentado por: ELOÍSA FUENTES CHAVERO

Director: SATURNINO DE ALBA ALONSO

Tutor académico:

D. SATURNINO DE ALBA ALONSO

En Madrid, a 29 de septiembre de 2020

ABREVIATURAS

C	Carbono
CALM	Circular Active Layer Monitoring
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de carbono
COS	Carbono orgánico del suelo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GTN-P	Global Terrestrial Network for Permafrost
IPA	International Permafrost Association
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (International Panel on Climate Change)
MOS	Materia Orgánica del Suelo
N	Nitrógeno
NSCD	Northern Circumpolar Soil Carbon Database
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
PCG₁₀₀	Potencial de Calentamiento Global en una escala temporal de 100 años
Pg de C	Petagramos de carbono ¹
ppm	Partes por millón
PPN	Productividad Primaria Neta
RCP	Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathway)
TSP	Thermal State of Permafrost

¹ 1 PgC = mil millones de toneladas métricas de C = 3,7 mil millones de toneladas de CO₂

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PERMAFROST:.....	11
1.2. TIPOLOGÍAS.....	13
1.3. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA	14
2. OBJETIVOS	16
3. MATERIAL Y MÉTODOS	16
4. RESULTADOS	19
4.1. PARÁMETROS DE MEDICIÓN DE LOS EFECTOS DE LA DESCONGELACIÓN DEL PERMAFROST	19
4.1.1. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO.....	19
4.1.2. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES QUÍMICAS DEL SUELO	21
4.1.3. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES BIOLÓGICAS DEL SUELO.....	23
4.2. EVOLUCIÓN DEL ESTADO DEL PERMAFROST	25
5. DISCUSIÓN.....	27
5.1. EL IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE:	27
5.2. EL COSTE DE OPORTUNIDAD EN EL MEDIO SOCIOECONÓMICO.....	29
5.2.1. IMPACTO ECONÓMICO EN INFRAESTRUCTURAS	30
5.2.2. IMPACTO SOCIOCULTURAL EN LA POBLACIÓN	31
6. CONCLUSIÓN.....	36
7. BIBLIOGRAFÍA.....	39

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Balance del reservorio de COS.....	10
Figura 2: Discordancia entre autores del C (Pg) presente en el permafrost.....	12
Figura 3: Distribución global del permafrost	14
Figura 4: Esquema de búsqueda bibliográfica.	17
Figura 5: Período de tiempo de las referencias bibliográficas seleccionadas.	18
Figura 6: Engranaje de la retroalimentación positiva de C.	21
Figura 7: Comparativa del PCG ₁₀₀ del CH ₄	22
Figura 8: Bibliografía analizada que diferencia entre CO ₂ y CH ₄	23
Figura 9: Comparativa de escenarios IPCC. Relación de ppm de CO ₂ con la extensión de permafrost (%).....	26

RESUMEN

El aumento de la temperatura global es efecto, y a la vez causa, del cambio climático. Este se acentúa por la emisión de GEI, procedentes de la quema de combustibles fósiles, la ganadería, la agricultura extensiva o los incendios forestales. Los ecosistemas se ven afectados por las condiciones climáticas de forma gradual, pero también abrupta en multitud de escenarios, como el permafrost.

En el permafrost, pilar clave de los ecosistemas más fríos del planeta, se está reduciendo el contenido en hielo, permitiendo la descomposición del COS almacenado durante miles de años. Al descomponerse, se libera C en forma de GEI, incentivando el cambio climático.

Con la descongelación se manifiestan numerosas implicaciones directas sobre las poblaciones, tales como ambientales (modificando la red de drenaje, generando inundaciones o sequías, colapsando el suelo, provocando la extinción de especies, etc.) y socioeconómicas (desabastecimiento de agua potable y alimentos, ausencia de un sistema de saneamiento y gestión de residuos, destrucción de infraestructuras, pérdida de tradiciones culturales, migración de la población, ausencia de políticas regulatorias, etc.). Indirectamente, también hay consecuencias a nivel global destacando la retroalimentación positiva de GEI, el incremento de temperatura, la necesidad de reubicar a refugiados climáticos o la pérdida de biodiversidad.

Para conocer la información disponible sobre la repercusión de la descongelación del permafrost, se realiza una revisión de bibliografía científica que recopila, de manera generalizada, el conocimiento en torno a esta temática para la obtención de conclusiones con las que continuar en futuras líneas de investigación. Se resuelve que, en la actualidad, no se conocen a ciencia cierta las secuelas por la difícil accesibilidad para la toma de muestras, la falta de información previa, el escaso desarrollo tecnológico, la ausencia de políticas regulatorias, la ineficacia de implantar medidas de mitigación, en lugar de prevención, y la despreocupación global de los gobiernos.

Palabras clave

Cambio climático; carbono; gases de efecto invernadero; suelo; termokarst.

ABSTRACT

The increase in global temperature is an effect, and at the same time a cause, of climate change. This is accentuated by the emission of GHG, it comes from the burning of fossil fuels, livestock, extensive agriculture or forest fires. Ecosystems are affected by climatic conditions gradually, but also abruptly in a multitude of scenarios, such as permafrost.

In permafrost, a keystone of the coldest ecosystems on the planet, the ice content is being reduced, allowing the decomposition of COS stored for thousands of years. When decomposed, C is released in the form of GHG, incentivizing climate change.

Because of permafrost thaw, numerous direct implications are manifested on the populations, such as environmental (modifying the drainage network, generating floods or droughts, collapsing the soil, causing the extinction of species, etc.) and socio-economic (shortage of drinking water and food, absence of a sanitation and waste management system, destruction of infrastructure, loss of cultural traditions, population migration, absence of regulatory policies, etc.). Indirectly, there are also global consequences highlighting positive GHG feedback, temperature rise, the need to relocate climate refugees or loss of biodiversity.

To find out the information available on the impact of permafrost thawing, a review of the scientific literature is carried out to collect, in a generalized way, the knowledge around this issue to obtain conclusions to continue in future lines of research. It is resolved that, currently, the consequences are not known for sure due to the difficult accessibility for sampling, the lack of prior information, the lack of technological development, the absence of regulatory policies, the ineffectiveness of implementing mitigation measures, instead of prevention, and the global carelessness of governments.

Keywords

Climate change; carbon; greenhouse gas emission; soil; thermokarst.

1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones climáticas del planeta tienden a evolucionar de forma gradual, sin embargo, puntualmente ocurre un evento climático extremo que provoca cambios abruptos en el medio ambiente. Éste evento es influenciado, principalmente, por factores naturales y tiene lugar hasta que se logra el equilibrio en la concentración de gases de la atmósfera, se definen las corrientes oceánicas, se alcanza la estabilidad climática, etc. (Hjort et al., 2018).

Las variaciones climáticas han ocurrido durante toda la edad geológica del planeta. Actualmente, la influencia antropológica está causando alteraciones drásticas desde mediados del siglo XIX. Concretamente, desde la Revolución Industrial, la capacidad del ser humano para influenciar la dinámica de los ecosistemas lleva a muchos autores a plantearse una nueva era geológica, el Antropoceno (Steffen et al., 2011).

El cambio climático, condicionado por el factor humano, implica modificaciones en los patrones estacionales, varía el régimen de precipitaciones o aumenta la temperatura hasta 3.1°C en el aire y 2.5°C en algunos tipos de suelo, como el permafrost (Box et al., 2019). La temperatura del suelo del Ártico está elevándose el doble de rápido que la temperatura global (Muster et al., 2015). Estas variaciones influyen en los factores bióticos, en los factores abióticos y en las interacciones existentes entre ellos.

Por un lado, los factores bióticos (los seres vivos y sus interacciones) experimentan cambios drásticos como producto de estas variaciones, afectando a las formas de vegetación, a los biomas y a la productividad primaria neta (PPN) (Elias, 2017; Schuur y MacK, 2018). La desaparición del hielo y de la nieve por el incremento de la temperatura puede desembocar en un menor aislamiento térmico para especies no hibernantes (los predadores mustélidos), la aparición de barreras físicas (como masas de agua) o la reducción de la efectividad del camuflaje regulado por fotoperiodo de algunas especies (como el zorro ártico) (Berteaux et al., 2017).

A lo anteriormente expuesto, se suman las comunidades humanas asentadas en zonas propensas a sufrir eventos climáticos, que suponen un riesgo para la población. El sector de la salud pública tiene el reto de asistir la vulnerabilidad desencadenada por el cambio climático (Mosites et al., 2018). La incertidumbre reside en los efectos de éste sobre la seguridad alimentaria, el acceso al agua potable, los efectos de los agentes erosivos, la pérdida de la identidad cultural, la destrucción de

las infraestructuras, etc. (Strawa et al., 2020). Todo esto está causado por un clima impredecible, el deshielo y la modificación de la red hídrica (Brubaker et al., 2011).

Por otro lado, los factores abióticos, principalmente el agua y el suelo, sufren ante los agentes erosivos que perturban o destruyen las redes de drenaje subterráneas y superficiales, los horizontes edafológicos, las propiedades del suelo y el paisaje (Davidson y Janssens, 2006; Schuur et al., 2015).

El estudio científico del suelo surge en el siglo XIX. Éste representa el sustento básico de los ecosistemas y es considerado un recurso natural no renovable en una escala de tiempo humana (Alba et al., 2011). Esta conclusión proviene de los resultados de los cálculos científicos, donde aseguran una tasa de formación de solo 0,025 a 0,125 mm de suelo al año (Parikh, S. J. y James, B. R., 2012).

El suelo está formado por la fracción mineral, que es el material geológico original (basamento), el cual ha evolucionado con el tiempo y la fracción orgánica, originada a través de los procesos de mineralización y humificación de la materia orgánica (Parikh, S. J. y James, B. R., 2012). Es el producto de los factores formadores como son los seres vivos, los eventos climáticos, el tiempo cronológico, el relieve o la topografía sobre un material pasivo (la roca madre) donde, debido a su alteración, se generan materiales existentes en él, pero con características morfológicas y una dinámica propia (Alba et al., 2011). Si se modificaran los factores formadores activos, se desnaturalizarían las propiedades del suelo (Parikh, S. J. y James, B. R.; 2012, Hartemink et al., 2016).

Las fases de evolución son estudiadas por la edafología, gracias a la cual se clasifica en capas denominadas horizontes (Hartemink, 2016). Cada capa cuenta con unas propiedades físicas (como son la textura, la estructura, el color, la porosidad, la permeabilidad, etc.) y químicas (como son el pH, la capacidad de intercambio catiónico, los elementos químicos, la conductividad eléctrica, etc.), que pueden ser modificadas por diferentes factores tales como la erosión, el aumento de temperatura, la disponibilidad o la ausencia de agua (Hartemink et al., 2016).

Estas variaciones en el ecosistema influyen en el reservorio de COS de la biosfera, el cual se ve desestabilizado por la transformación del uso del suelo y las consecuencias del cambio climático (Koven et al., 2011; Ping et al., 2015).

La temperatura, factor dominante, afecta al suelo y al reservorio de COS al influir en la formación de agregados que permiten la actividad biológica y protegen a la materia orgánica del suelo (MOS) (Schuur et al., 2015; Schuur y Mack, 2018). Con el incremento de la temperatura, se aceleran las reacciones de adsorción y desorción de materia orgánica en superficies minerales y se determina el agua disponible mediante los procesos de precipitación y evapotranspiración (Koven et al., 2011).

El reservorio de COS varía en función del balance de C de entrada y el C de salida del ecosistema. Ambos son dependientes de factores climáticos y particularmente cada uno se ve influenciado por los componentes mostrados a continuación (Figura 1) (Davidson y Janssens, 2006).

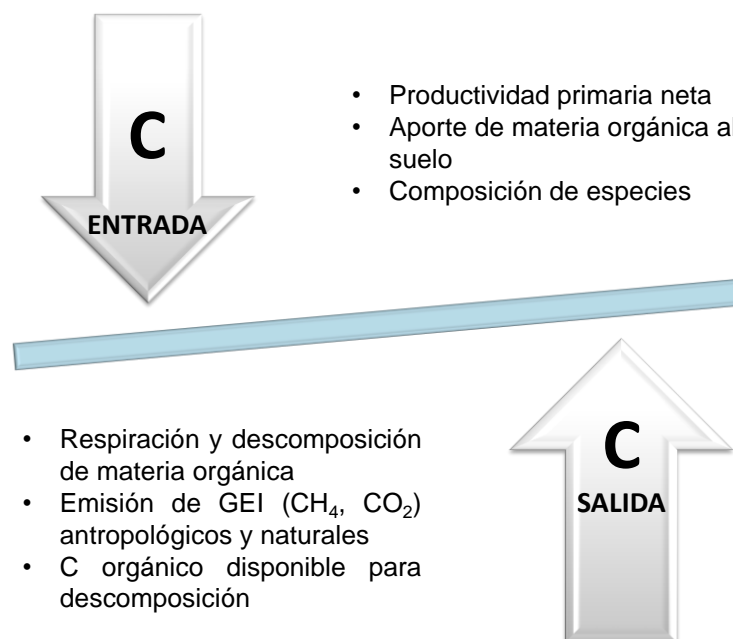


Figura 1: Balance del reservorio de COS.

El C del que se dispone menor información es el COS congelado en el permafrost. Cuando la temperatura ocasiona el deshielo, éste queda disponible para los procesos de descomposición y respiración (Davidson y Janssens, 2006; Hugelius et al., 2014).

El permafrost se define como *un tipo de suelo o roca con material orgánico incluido que permanece a una temperatura de al menos 0°C durante mínimo dos años consecutivos* (Ping et al., 2015; Weiss et al., 2016; Potapowicz et al., 2019). Se puede ubicar bajo la base helada de los glaciares y las capas de hielo, siempre que la presión

y temperatura lo permitan, al ser resultado del intercambio de calor entre la superficie terrestre y la atmósfera (Zhang et al., 2008; Kanevskiy et al., 2013). La degradación del permafrost puede afectar a la textura, comprometer la disponibilidad de nutrientes o afectar a la biodiversidad o a la composición de especies del ecosistema (Yang et al., 2010).

A pesar de la información disponible, es evidente que el conocimiento sobre el permafrost es limitado y que no se conoce realmente su alcance, sobre todo, por las dificultades en la toma de muestras, debido a la poca accesibilidad, y a las inclemencias climáticas de las áreas de muestreo. Siendo una temática de vital importancia a nivel global, resulta muy interesante realizar estudios que reúnan de manera general todos estos aspectos ya investigados, de los cuales, se pueda identificar dónde están los vacíos de conocimiento que las futuras líneas de investigación deben abordar.

1.1. CARACTERÍSTICAS DEL PERMAFROST:

Ping et al., (2015) establecen que el permafrost puede presentar tres capas: la de transición, la capa intermedia y la capa congelada.

Sobre el permafrost se localiza *la capa activa*. La profundidad de ésta varía cada año dependiendo de las condiciones climáticas, la duración de la cobertura aislante de nieve, el espesor de ésta, el porcentaje de agua o la conductividad térmica (Berteaux et al., 2017). La capa activa anualmente se somete a procesos estacionales de congelación y descongelación (Schuur y Mack, 2018), pero el cambio climático provoca su desarrollo cada vez a más profundidad (Jansson y Taş, 2014). Esta capa es el suelo más joven, formado desde el Holoceno, y es producto de las condiciones climáticas, geomorfológicas y ecológicas. Se caracteriza por poseer un estrato superficial (horizonte O) rico en materia orgánica o totalmente compuesto por un horizonte mineral (horizonte A) (Nitzbon et al., 2020).

La capa de transición es la más superficial. Presenta modificaciones estructurales y es el resultado de las fluctuaciones acontecidas en la última década (Ping et al., 2015). Junto a ésta, se ubica *la capa intermedia*, formando la sección más superficial del permafrost. En esta última se pueden encontrar cristales de hielo y una matriz helada en una escala temporal de cien años (Ping et al., 2015; Schuur y Mack, 2018). Bajo ellas, se encuentra el permafrost, que permanece congelado y no se ve afectado por los procesos de congelación y descongelación en una escala temporal de mil años.

Esta última capa congelada contiene los horizontes más primitivos (Ping et al., 2015; Schuur y Mack, 2018).

Los autores coinciden en la estructura pero, sin embargo, difieren en la composición del permafrost, como ocurre con la cantidad de C almacenado (Figura 2).

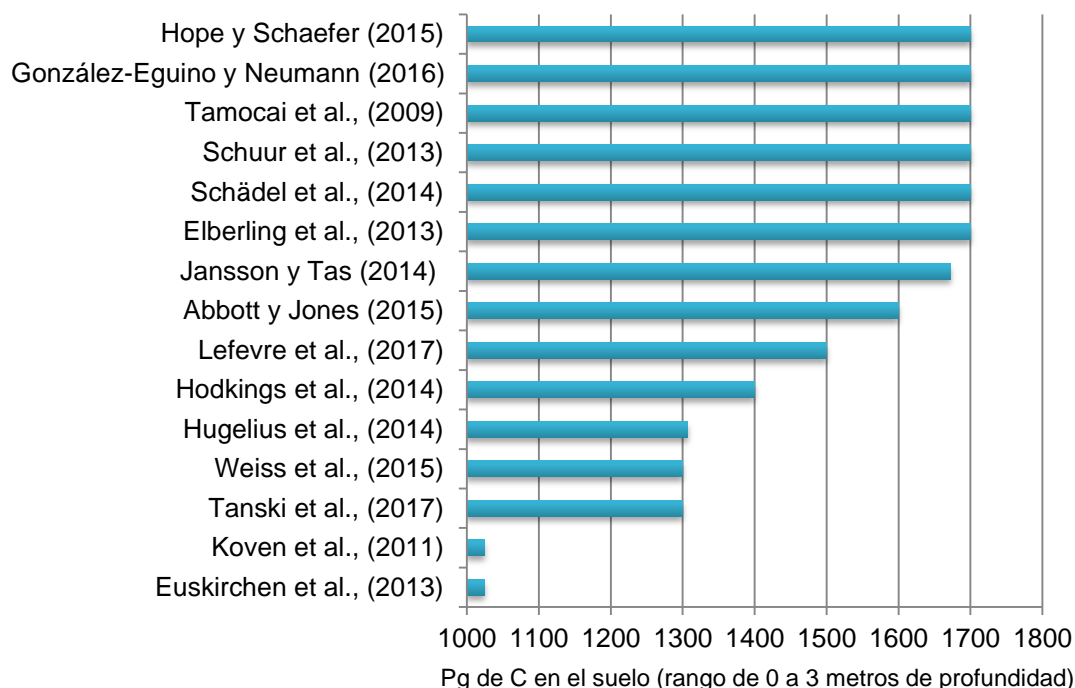


Figura 2: Discordancia entre autores del C (Pg) presente en el permafrost.

En las regiones donde está presente el permafrost se almacena más de la mitad de la cantidad global de MOS (Abbott y Jones, 2015). Lefevre, C., Rekik, F., Alcantara, V. Wiese (2017) definen MOS como *los constituyentes orgánicos presentes en el suelo, tales como tejidos de plantas y animales muertos, materiales de 2 mm de tamaños y organismos del suelo*. La MOS es una de las mayores reservas de COS, la cual contiene aproximadamente del 55 al 60% de C en masa (Abbott y Jones, 2015). De hecho, se acumula el doble de C en el suelo que lo contenido en la atmósfera (Tamocai et al., 2009; Schuur y Abbott, 2011; Elberling et al., 2013; Schädel et al., 2014; Nauta et al., 2015; González-Eguino y Neumann, 2016; Weiss et al., 2016).

Por otro lado, en las regiones del Círculo Polar Norte se almacena del 30 al 40% de la reserva de C global en los primeros tres metros (Ping et al., 2015). La base de datos del COS del Círculo Polar Norte (NCSCD, por sus siglas en inglés, Northern Circumpolar Soil Carbon Database) alegan que el mayor porcentaje de Pg de C se encuentra almacenado en la sección del permafrost de 0 a 3 metros de profundidad (Hugelius et al., 2014), pero autores como Schuur et al., (2015) concluyen que no todo

está en la región de 0-3 metros, destacando las formaciones de Yedoma en Siberia y Alaska.

La región del Círculo Polar Norte solo cubre el 15% de la superficie global del planeta, y contiene del 10 al 20% de la reserva global de C vegetal (biomasa) (Hugelius et al., 2014; Ping et al., 2015). Esta gran desproporción es debida a la lenta tasa de descomposición de la MOS, fruto de las bajas temperaturas y las condiciones anaeróbicas del suelo (Schuur et al., 2013).

1.2. TIPOLOGÍAS

Se puede establecer una clasificación de los tipos de permafrost según los siguientes criterios:

- En función del *contenido en hielo* se distinguen las zonas con más de un 20% del volumen de hielo y relativamente poco espesor en las latitudes altas y, por otro lado, las zonas con menos del 10% del volumen de hielo, como ocurre en las regiones montañosas (Tamocai et al., 2009).

Dos tercios del total del área del permafrost tienen menor contenido en hielo que el tercio restante (Schuur y MacK, 2018). Nitzbon et al., (2020) afirman que, en aquellos paisajes con poco contenido en hielo, la magnitud y el ritmo de la degradación es menor que en los de gran abundancia, como resultado de los ciclos de retroalimentación positiva, responsables de acelerar la descongelación de las masas de hielo (Fan et al., 2011).

- Hay dos tipos en base a *cuándo se formaron*. Ambos tipos son susceptibles al deshielo bajo las fluctuaciones climáticas contemporáneas (Tamocai et al., 2009).

El primero, más común, es el remanente del paleoclima y se distribuye por llanuras y colinas de la región del Círculo Polar Norte, en las formaciones en Yedoma, en el noreste de Rusia, en el Ártico, en Alaska o en la región de Yukon en Canadá (Nitzbon et al., 2020).

El segundo tipo, más reciente, se formó durante el Holoceno debido al proceso de desglaciación, seguido de una sucesión de comunidades vegetales bajo condiciones climáticas muy frías en el Ártico y en las regiones boreales (Nitzbon et al., 2020).

- Por último, se distinguen 4 tipos o zonas según el *porcentaje del área que contiene permafrost*: continuo, discontinuo, aislado y esporádico (Schaefer et al., 2012).

Se denomina continuo a aquellas zonas con una fracción de permafrost del 90-100% y, por otro lado, es discontinua si presenta un 50-90% (Schaefer et al., 2012)..

Las zonas más escasas son las definidas como esporádicas, con un 10-50%, y aisladas, con menos de un 10% (Schaefer et al., 2012).

De todo el permafrost terrestre, el 54% pertenece al área continua, cuyo límite son los 50-60°N. El 46% restante se reparte por igual en el resto del mundo entre las zonas discontinuas, esporádicas y aisladas (Schuur y Mack, 2018).

1.3. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA

El permafrost ocupa el 25% de la superficie terrestre del hemisferio norte (Yang et al., 2010; Schuur y MacK, 2018; Biskaborn et al., 2019; IPA, 2020) y abarca el 16% del área global terrestre, es decir, $18,78 \times 10^3 \text{ km}^2$ (Zhang et al., 2008; Tamocai et al., 2009). Geográficamente, el 65% de éste se sitúa en Eurasia y el 35% restante se localiza entre Groenlandia y América (Schuur y MacK, 2018).

El permafrost se ubica en llanuras, en colinas, en turberas, en las montañas de la región circumpolar, en las regiones boreales, en las regiones alpinas, en las altas mesetas del hemisferio norte, en la Antártica, etc. (Potapowicz et al., 2019).

En 1996, la IPA (por sus siglas en inglés, International Permafrost Association) reconocía la necesidad de crear cartografía donde se reflejase la distribución y las propiedades del permafrost en el hemisferio norte. Brown et al., (1997) presentó un mapa (Figura 3) donde incluía el terrestre, el submarino y las áreas masivas de hielo. La mayoría es terrestre, aunque destaca la superficie de permafrost bajo el océano Ártico, de $3 \times 10^6 \text{ km}^2$, formada durante la última era glacial (Schuur y MacK, 2018).

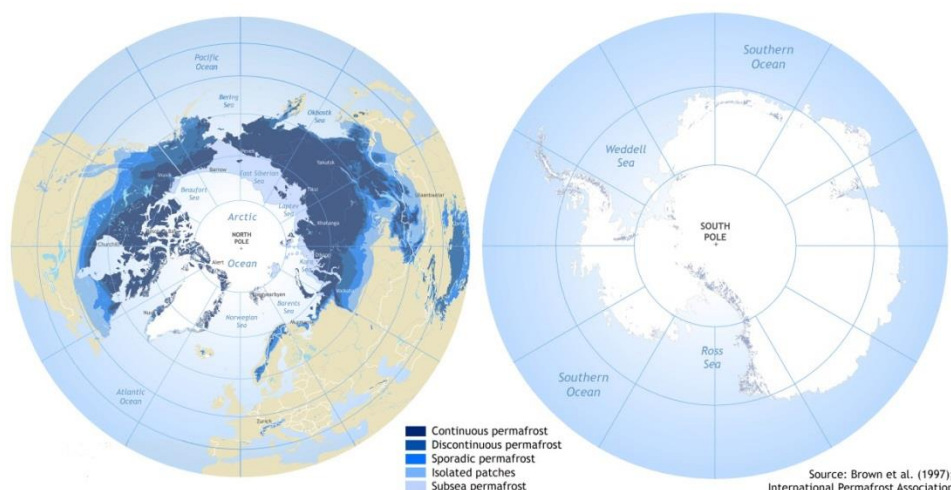


Figura 3: Distribución global del permafrost (Fuente: Brown et al., 1997).

Zhang et al., (2008) establece que la actual distribución del permafrost es producto de:

- La latitud. Condiciona el ángulo de incidencia de la radiación solar y la energía adsorbida por la superficie terrestre (Zhang et al., 2008). En latitudes altas, la temperatura ha aumentado 0.6°C en los últimos 30 años, el doble de rápido que la media global (Euskirchen et al., 2013; Schuur et al., 2015; Hope y Schaefer, 2016).

El permafrost se extiende desde los 26°N en el Himalaya hasta los 84°N en el norte de Groenlandia, con el máximo ubicado entre los 60 y los 68°N y un pico en los 35°N en el Tíbet, en China y en las Montañas Rocosas en Estados Unidos (Zhang et al., 2008).

Aproximadamente, el 70% del permafrost global está distribuido entre los 45 y 67°N, y el 10% se localiza al sur de los 40°N. A su vez, al norte de 67°N disminuye la presencia debido al descenso del área terrestre superficial y a la presencia del Océano Ártico (Zhang et al., 2008).

- La longitud. Se distribuye según la distancia a la costa y a las condiciones climáticas. Al oeste del hemisferio norte se halla el 37% del permafrost (Alaska, Canadá, Groenlandia) y al este se encuentra el 63% (Siberia, este de Rusia, norte de Mongolia, noreste de China y Tíbet) (Zhang et al., 2008).
- La altitud. Afecta regionalmente a la distribución debido al gradiente vertical de temperatura, por el cual descienden 0.6°C cada 100 metros de altitud (Zerefos et al., 2011). Zhang et al. (2008) definen el permafrost en elevaciones altas como *alpino o de montaña* en contraste con el *polar*.

El área del permafrost disminuye según aumenta la elevación desde el nivel del mar a 700 metros. El 62% en el hemisferio norte se sitúa por debajo de los 500 m.s.n.m. y el 78% bajo los 1000 m.s.n.m. Por encima de los 2000 m.s.n.m. se ubica el 11.5% y entre los 2000 y 4500 m. s. n. m. solo el 5% (Zhang et al., 2008).

2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente documento es realizar una revisión bibliográfica para determinar el impacto de la descongelación del permafrost mediante las consecuencias provocadas en el medio ambiental y socioeconómico.

Los objetivos específicos son:

- Analizar la información disponible sobre las causas de la descongelación del permafrost asociadas al cambio climático.
- Identificar la relación entre la descongelación y la pérdida de los servicios ecosistémicos.
- Estimar el coste de oportunidad de las poblaciones afectadas por la descongelación.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

El presente documento es una revisión bibliográfica sobre cómo la descongelación del permafrost, causada por el incremento de la temperatura global, afecta al medio socioeconómico y ambiental actualmente y a medio-largo plazo.

Para ello, se lleva a cabo la revisión de la literatura científica disponible en los buscadores ScienceDirect, Dialnet y Scopus. Se extraen los artículos relacionados con la temática anteriormente expuesta mediante la búsqueda de las palabras clave.

Para hacer más efectiva la búsqueda, se establecen los siguientes criterios básicos para cribar la información. Se establecen los siguientes criterios de inclusión:

- Que sea documentación publicada entre 1995 y 2020, ambos inclusive.
- Que contenga el mayor número de palabras clave.
- Que esté redactada en español o en inglés.
- Que sea publicada en fuentes de referencia verídica y de rigor científico como libros, revistas de divulgación o sitios web contrastados.

Los criterios de exclusión son:

- Referencias al permafrost marino. Solo se considera el permafrost de la masa terrestre superficial.
- Opiniones de expertos o documentación subjetiva.
- Documentos resúmenes de artículos o congresos.

El proceso de búsqueda está reflejado en la Figura 4.

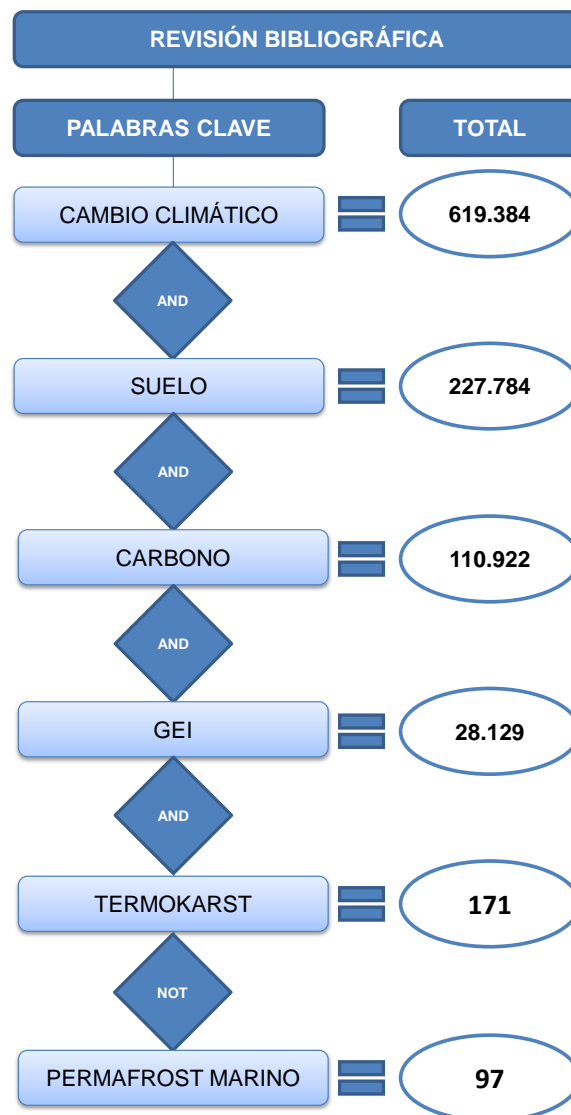


Figura 4: Esquema de búsqueda bibliográfica.

Tras la aplicación de los criterios, se han seleccionado 97 referencias y se han excluido 74 en el último cribado. El 66% de éstas se encuentra comprendida entre los años 2013 y 2019, tal y como muestra la Figura 5.

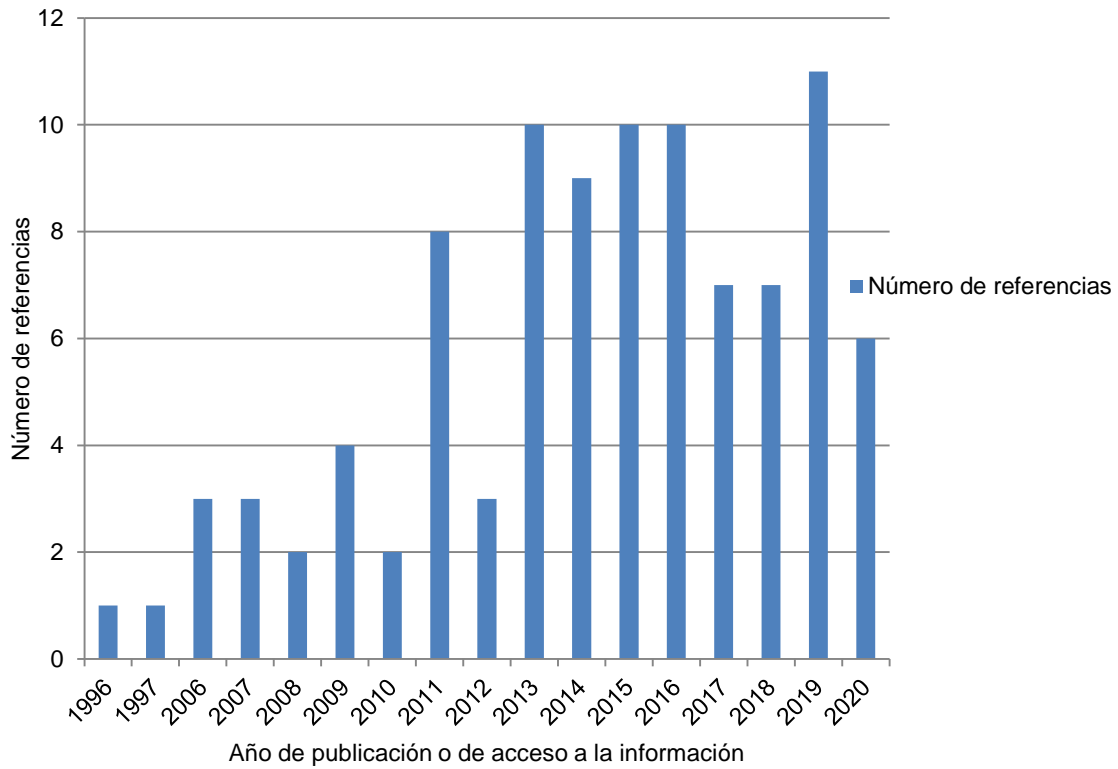


Figura 5: Período de tiempo de las referencias bibliográficas seleccionadas.

Una vez identificadas, se organizan mediante la herramienta Mendeley y se procede a un análisis de la información seleccionada. Se ordenan las referencias por temática en tres grupos, según los objetivos específicos del presente documento: cambio climático y retroalimentación del C, servicios ecosistémicos del permafrost y afección socioeconómica de la descongelación.

4. RESULTADOS

En 1990 comienza a documentarse la descongelación del permafrost (IPCC, 1996; Schuur et al., 2009) y, para diagnosticar los síntomas, Abbott y Jones (2015) utilizan el *termokarst*. Este fenómeno es un tipo de erosión térmica originada por el aumento de la temperatura y vinculada al contenido de hielo en el suelo, al tipo de sustrato y al grado de inclinación de la pendiente (Abbott y Jones, 2015; Gariano y Guzzetti, 2016; Istomin y Habeck, 2016; Tanski et al., 2017).

4.1. PARÁMETROS DE MEDICIÓN DE LOS EFECTOS DE LA DESCONGELACIÓN DEL PERMAFROST

De la descongelación del permafrost se pueden observar las alteraciones mostradas a continuación.

4.1.1. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES FÍSICAS DEL SUELO

El termokarst es consecuencia de la descongelación y el colapso del suelo. Puede tener lugar verticalmente si se hunde la capa activa, o lateralmente, por influencia de la transmisividad de calor de los flujos de agua subterráneos o superficiales (Jorgenson et al., 2011; Schuur et al., 2015;).

El termokarst conlleva cambios significativos en la morfología del paisaje en función de las interacciones entre la pendiente, la textura, la red de drenaje y la vegetación existente (Abbott y Jones, 2015). Como resultado, puede promover la aparición de accidentes geográficos, como lagos o pantanos, asociados a los flujos de agua subterránea y la formación de montículos de tierra irregulares (Jorgenson et al., 2011; Ping et al., 2015). A su vez, se desarrollan procesos como la compactación o el crecimiento del espesor de la capa activa y el colapso o la subsidencia de los horizontes edafológicos por el deshielo en las capas subterráneas (Pearce y Smit, 2013; Plaza et al., 2019). Estos colapsos de la superficie son irreversibles en una escala de décadas a siglos (Lewkowicz y Way, 2019).

El termokarst desplaza la capa orgánica, permitiendo la transmisión de calor y favoreciendo los procesos de respiración. Éste interacciona con los parámetros del paisaje (Abbott y Jones, 2015). Janssons y Tás (2014) observan la aparición de redes de polígonos resultantes de la descongelación del suelo de 1,5 a 2 metros de

diámetro. Se identifican, también, polígonos de 10 a 15 metros de ancho, denominados *yumbar* (Istomin y Habeck, 2016).

Además, se forman pequeños regueros por el paso del agua (*rill erosion*), que derivan en cárcavas (*gullies*) o canales de agua superficial por los cuales se drenan grandes superficies (Abbott y Jones, 2015; Gariano y Guzzetti, 2016; Tanski et al., 2017). Si estos canales son subterráneos generan la subsidencia del suelo o *piping* (Jorgenson et al., 2011).

El hielo del permafrost ocupa un volumen de 200 a 500 x 10³ kilómetros cúbicos, o en torno al 1% del volumen de hielo de la Tierra (Zhang et al., 2008). Al descongelarse, el aporte de agua modifica la red de drenaje, desplaza la materia orgánica y fragmenta el paisaje en varios tipos de ecosistemas, tanto húmedos como secos. Se forman pantanos, lagos o pozas responsable de agravar la erosión y acelerar la descongelación (Istomin y Habeck, 2016; Saulnier-Talbot y Lavoie, 2018). Cuando se forman estas masas de agua líquida, se origina bajo su superficie una capa de suelo denominada *talik*, que no se congela en todo el año (Yang et al., 2010; Nitze et al., 2018). Ésta es responsable de la transmisividad de calor y es capaz de agravar el deshielo del permafrost adyacente, producir el hundimiento del fondo del lago, la expansión lateral o la movilización del COS más antiguo en escalas de tiempo cortas (Tamocai et al., 2009; Walter Anthony et al., 2018; Plaza et al., 2019). Los grandes lagos del hemisferio norte se han originado por la descongelación del permafrost y la aparición de estos taliks (Schuur y MacK, 2018). La formación de lagos puede originar un reemplazo de especies con baja PPN a otras con alta PPN, convirtiendo al ecosistema en un sumidero de COS (Xiao et al., 2015; Schuur y MacK, 2018).

En el caso opuesto, también tienen lugar sequías extremas y la desertificación al modificarse la red de drenaje, por ejemplo, desencadenando la desaparición de los humedales y la pérdida del 25 % del COS de estos ecosistemas (Davidson y Janssens, 2006).

Xue et al., (2009) definen la *desertificación* como la *degradación de la tierra a un ambiente árido, semiárido y/o subhúmedo resultado de varios factores como las variaciones climáticas y las actividades humanas*. En la meseta Tibetana-Qinghai, el área de permafrost disminuyó en 10⁵ km² de 1987 a 2000 (Xue et al., 2009). El agua almacenada quedó disponible para la evapotranspiración y comenzó a ser usada por vegetación arbustiva y de porte arbóreo. En el mismo período de tiempo, el área desertificada pasó de 12.877 km² a 16.330 km² debido a que la mitad de los ríos se secaron y disminuyó el nivel freático del agua subterránea 5 metros en los últimos 10

años (Xue et al., 2009). Este suceso tiene 3 veces más impacto sobre el cambio climático que cuando la misma superficie de suelo está inundada bajo condiciones anaeróbicas y se emite CH_4 (Xue et al., 2009).

Con la elevación de la temperatura y la ocurrencia de las sequías, se agrava el régimen de incendios al presentar intervalos de retorno más cortos, al ampliarse la frecuencia y la severidad de éstos (Davidson y Janssens, 2006; Euskirchen et al., 2013). Los incendios son un claro indicador indirecto de la presencia del permafrost (Nitze et al., 2018; Box et al., 2019).

4.1.2. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES QUÍMICAS DEL SUELO

Cuando el termokarst ha roto los agregados del suelo, crece la disponibilidad de MOS, nutrientes y C en superficie, pero también las emisiones de GEI (Hodgkins et al., 2014). Acontece la retroalimentación positiva de C debido a la reacción de un estímulo inicial, amplificado por el estímulo en sí mismo (Figura 6) (Fan et al., 2011; Pearce y Smit, 2013). El estímulo inicial es el incremento de la temperatura por el calentamiento global. La reacción a este estímulo es la descongelación del permafrost, acrecentando la emisión de GEI y elevando, consecuentemente, la temperatura global (Koven et al., 2011; Euskirchen et al., 2013; Schaphoff et al., 2013; Mondav et al., 2014).

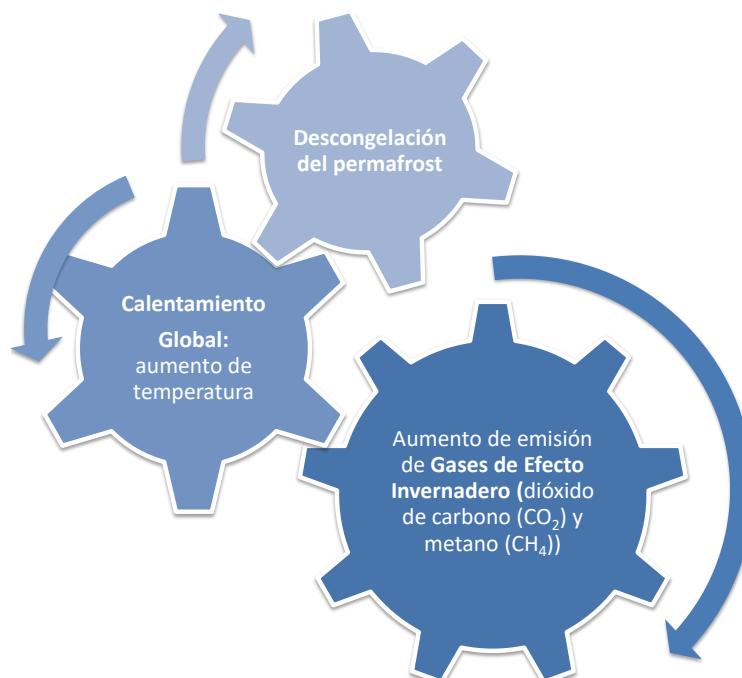


Figura 6: Engranaje de la retroalimentación positiva de C.

Debido a este engranaje, los sumideros de COS se convierten en fuentes de emisión de C en forma de GEI. Schaefer et al., (2014) denomina a este mecanismo PCF (por

sus siglas en inglés, Permafrost Carbon Feedback) y representa la amplificación del calentamiento de la superficie de la tierra debido a las emisiones de GEI (CH₄, CO₂, etc.) generadas por la descomposición de la MOS disponible tras descongelarse el permafrost. Este proceso es irreversible a una escala de tiempo humana (Maltini, 2015; Weiss et al., 2016).

La capa de permafrost impide el drenaje, dejando al suelo en un estado frío y mojado, condicionando los procesos de oxidación, reducción y descomposición de la MOS (Davidson y Janssens, 2006; Fan et al., 2011). Los humedales y las turberas, al estar saturados de agua, presentan condiciones anaeróbicas por las cuales la descomposición de la MOS se ralentiza (Davidson y Janssens, 2006).

Cuando el suelo está congelado, todos los poros están saturados de agua helada, por lo que hay limitaciones de agua disponible, MOS y nutrientes. En este estado, la descomposición de MOS queda suspendida. Al descongelarse, aumenta el espesor de la capa activa y, por tanto, hay mayor MOS afectada por los procesos de descomposición y emisión de GEI (Elberling et al., 2013; Hayes et al., 2014; González-Eguino y Neumann, 2016; Schädel et al., 2016; Oliva y Fritz, 2018).

La influencia climática de los GEI se mide con el Potencial de Calentamiento Global (PCG₁₀₀) en una escala temporal de 100 años (Lefevre, C.; Rekik, F.; Alcantara, V.: Wiese, 2017). El PCG₁₀₀ del CO₂ es de 1 frente al PCG₁₀₀ del CH₄. Este valor varía en función del autor, desde valores de 23 a 34 PCG₁₀₀ (Figura 7), obteniendo un valor medio de 28, extraído de las referencias bibliográficas analizadas.

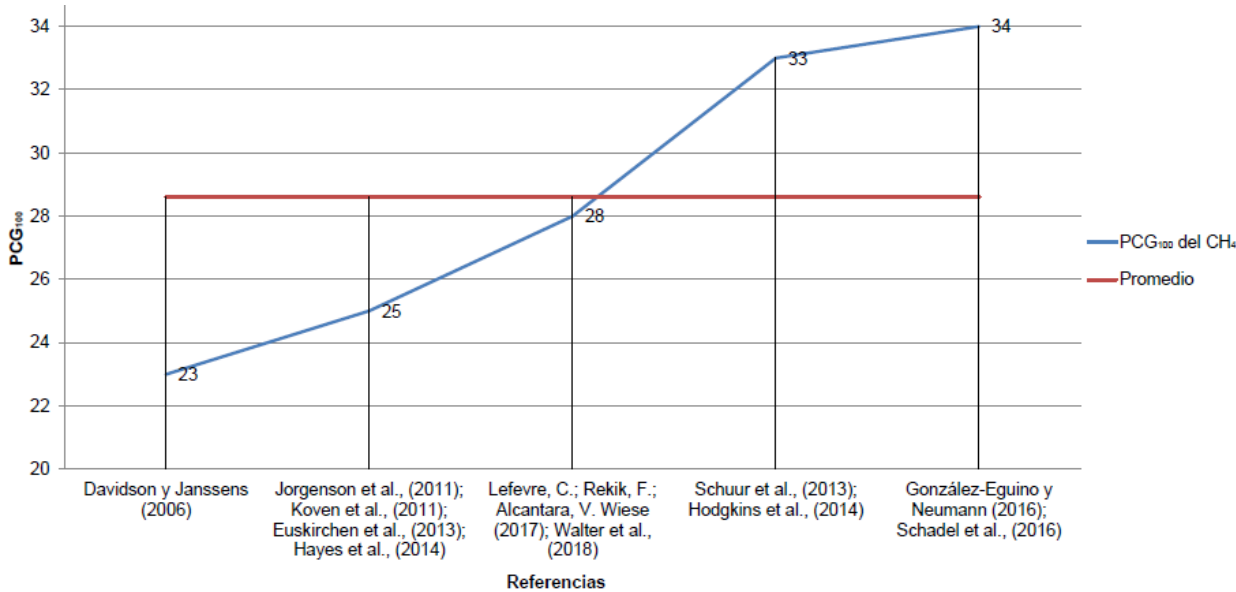


Figura 7: Comparativa del PCG₁₀₀ del CH₄.

Hay modelos de previsión donde no diferencian entre CO₂ y CH₄. Hay otros que solo hablan de emisiones de C totales (Burke et al., 2017). En la Figura 8 se puede observar como solo el 43% de las referencias bibliográficas analizadas sí realizan esta distinción.

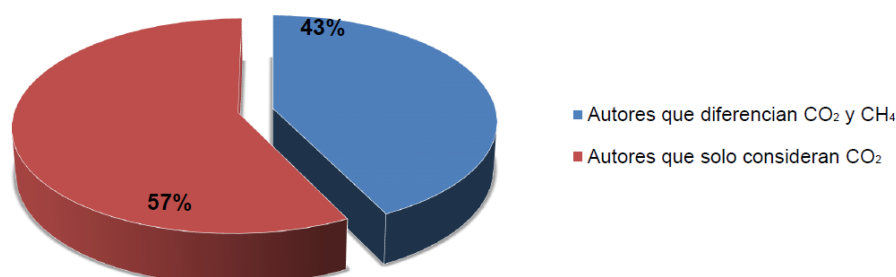


Figura 8: Bibliografía analizada donde se diferencia entre CO₂ y CH₄.

Los modelos biogeoquímicos de Euskirchen et al., (2013) estiman un aporte neto de CH₄ del Ártico de 41.5 Tg de CH₄ año⁻¹, con un aumento de 0.5 Tg de CH₄ año⁻¹ desde 1997 a 2006.

El COS es liberado lentamente durante décadas, pero los modelos predicen que para el año 2100 se habrá descongelado el 25% del permafrost global y habrá sido liberado el 59% del COS de éste. Esto supone la emisión de 232 a 380 millones de toneladas de C en forma de GEI (Davidson y Janssens, 2006; Schuur et al., 2013, 2015).

4.1.3. ALTERACIÓN DE LAS CONDICIONES BIOLÓGICAS DEL SUELO

El permafrost es un componente estructural que regula los ecosistemas y aporta un nicho ecológico clave para la fauna, la flora y los microorganismos adaptados al frío (Jansson y Taş, 2014).

Los microorganismos presentes se clasifican como psicrófilos o criófilos y se caracterizan por ser capaces de crecer y reproducirse en ambientes de bajas temperaturas, entre -17°C y 10°C (Jansson y Taş, 2014). La temperatura y la disponibilidad de agua son los factores más influyentes en los niveles de biomasa y diversidad bacteriana (Fritz et al., 2017). En el permafrost, se homogeniza la estructura trófica a través de los horizontes, pero los cambios abruptos dejan al descubierto el horizonte mineral donde se intensifica la descomposición (Nitzbon et al., 2020). Esto supone una oportunidad para la modificación de la comunidad vegetal y un nuevo reclutamiento de especies, denominado el *despertar biótico* (Sistla et al., 2013; Schuur y MacK, 2018).

La dinámica del suelo y el papel del permafrost son vitales en la regulación de las respuestas de los seres vivos al cambio climático (Elias, 2017). Éste trastoca la distribución vertical y horizontal de C, la cantidad de biomasa, la cobertura arbustiva y la estructura y actividad trófica. En lo que respecta a la fauna, también pueden ocurrir modificaciones fisiológicas, de comportamiento y ecológicas (Elias, 2017).

Por un lado, el calentamiento global agudiza la descomposición microbiológica y la disponibilidad de sustrato orgánico disponible (Nitzbon et al., 2020). Natali et al., (2012) realizaron una investigación en Alaska para conocer los cambios en la fenología y el crecimiento de la tundra cuando el permafrost se ha descongelado. Observaron un aumento del 20% de la biomasa, acumulada en comunidades de tundra, y la intensificación de la PPN por el incremento de nutrientes disponibles (Fan et al., 2011; Markkula et al., 2019). También, advirtieron variaciones en la fenología de las plantas al acrecentarse el tamaño de los individuos y el tiempo de adsorción de C. Los investigadores concluyeron que en 20 años había crecido un 50% el reservorio de C en plantas, se había alterado la comunidad vegetal y el Reino Fungi se había extendido. Al mismo tiempo, en profundidad se estratificó en biomas, enriqueciendo la biodiversidad y la conectividad del suelo (Natali et al., 2012).

Por otro lado, los ecosistemas dominantes en las regiones del permafrost son el bosque boreal y la tundra (Elias, 2017). Ésta última, localizada al norte en el Círculo Polar Ártico y en zonas elevadas, está conformada por comunidades sin porte arbóreo tales como líquenes, musgos o arbustos (Schaefer et al., 2012; Elias, 2017). El calentamiento global aumenta la biomasa y la dominancia de la comunidad vegetal de porte arbóreo y arbustivo, por lo que en este tipo de ecosistemas tendría lugar una sucesión secundaria y modificaciones en la composición de especies (Sistla et al., 2013; Berteaux et al. 2017).

Los individuos de porte arbóreo y arbustivo atrapan la nieve y promueven una subida de la temperatura del suelo, promoviendo la descomposición y acelerando la descongelación (Natali et al., 2012; Schaphoff et al., 2013). Sistla et al., (2013) observaron un aumento del 94% en la cobertura arbustiva y un incremento de la biomasa del 40%. Como consecuencia, en la superficie se reduce la relación C:N, reflejando la disminución de líquenes y musgos ricos en C y el aumento de restos arbustivos (*Betula nana* o *Rubus chamaemorus*) con menor relación C:N (Natali et al., 2012). Al sustituirse las plantas no vasculares por la comunidad arbustiva, se modifica la naturaleza y la localización de los aportes de C en superficie y crece la biomasa de raíces en profundidad (Natali et al., 2012). Esto influencia la alteración en la actividad y en la estructura de la comunidad de descomponedores. Por ejemplo, el musgo (*Labile*

Sp.) posee gran cantidad de N y es de descomposición rápida por comunidades de bacterias (Natali et al., 2012). Cuando este musgo es sustituido por una comunidad arbustiva, los restos de madera son abundantes y presentan un alto contenido en lignina, cuya descomposición se realiza lentamente por redes de hongos (Schuur y Mack, 2018).

4.2. EVOLUCIÓN DEL ESTADO DEL PERMAFROST

La IPA, 2020, considera el permafrost como un paleotermómetro al permitir analizar las fluctuaciones de temperatura del planeta desde el siglo XIX. Con la elevación de la temperatura, se observan modificaciones del paisaje que alertan sobre el estado actual, el aumento del espesor de la capa activa del suelo, la formación de taliks, la reducción de la cobertura de hielo y nieve, etc. (Hugelius et al., 2014; Gariano y Guzzetti, 2016; Lewkowicz y Way, 2019).

La evolución del permafrost se estudia mediante la GTN-P (Global Terrestrial Network for Permafrost), encargada de observar el estado y los niveles de degradación (Schaefer et al., 2014). Para ello, se monitorean dos redes de muestreo accesibles para la toma de datos, el TSP (Thermal State of Permafrost), responsable de medir la temperatura a distintas profundidades y ubicaciones, y el CALM (Circular Active Layer Monitoring), que examina el espesor de la capa activa y la descongelación máxima anual (Schaefer et al., 2014; IPA, 2020).

Destacan iniciativas de medición como Next Generation Ecosystem Experiment (NGEE) en Estados Unidos, para predecir los efectos del deshielo, el Danish Center for Permafrost (CENPERM), el cual estudia los efectos en Groenlandia. También destaca el Norwegian Research Council (NORKLIMA), centrado en la variación de los procesos bioquímicos del Ártico o la Earth Microbiome Project (EMP), dedicada a realizar mediciones y a monitorear la evolución (IPA, 2020).

Si se siguen trastocando las condiciones climáticas, solo el más profundo persistirá al ser más resistente, como en el norte de Siberia o el noreste de Canadá (Reyes et al., 2010). La IPA, 2020, asegura el ensanchamiento de la capa activa y cambios de temperatura en el permafrost menos profundo, pero sin desaparecer total.

El último informe del IPCC, 2014, respalda que las emisiones de GEI presentan un margen de variación amplio en función de la aplicación de políticas climáticas y el desarrollo socioeconómico. En él, se establecen futuros posibles escenarios denominados RCP (o Trayectorias de Concentración Representativas), donde simulan distintas variaciones en las concentraciones de GEI y en el uso del suelo hasta

el año 2100. Los escenarios más extremos son los siguientes (Figura 8):

- **RCP 2,6:** es el escenario de mitigación más estricto, se centra en evitar el aumento de la temperatura, provocada por el calentamiento global, de al menos 2°C por encima de las temperaturas preindustriales. Para 2100 se estima un incremento de media global en superficie de 1.1°C a 2.6°C. Los expertos calculan una concentración de CO₂ de 421 ppm y una reducción del área del permafrost del 37% (IPCC, 2014; Chen et al., 2020).
- **RCP 8,5:** es el escenario con la proyección más catastrofista por el alto número de emisiones de GEI y la variabilidad climática, pudiendo afectar negativamente a las actividades humanas, como la producción de alimentos. Para 2100, se valora un aumento de media global en superficie de 2.6°C a 4.8°C. Los expertos valoran una concentración de CO₂ de 936 ppm y una disminución del área del permafrost del 81% (IPCC, 2014; Chen et al., 2020).

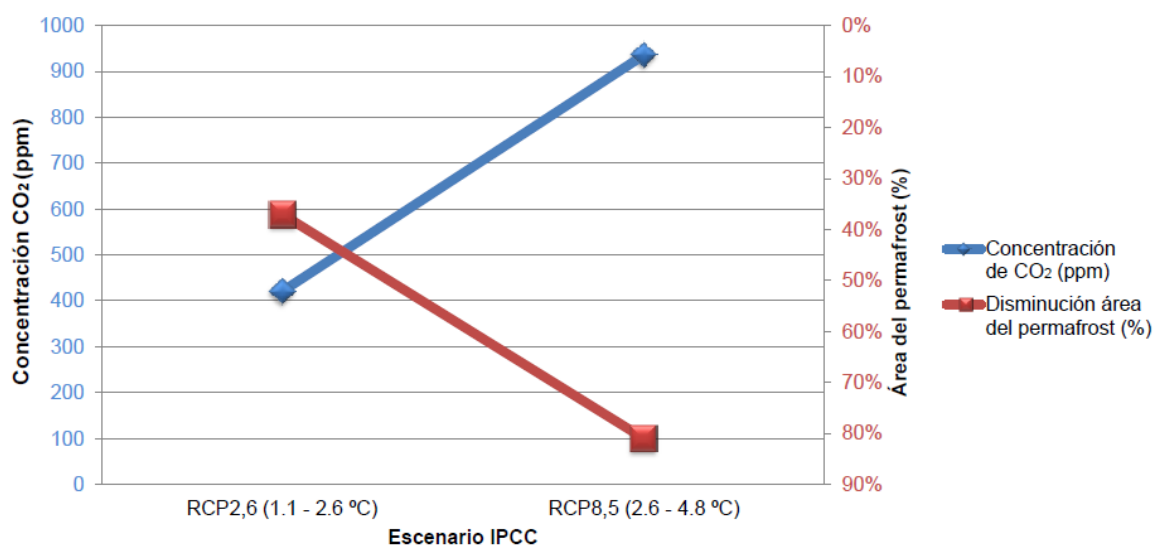


Figura 9: Comparativa de escenarios IPCC. Relación de ppm de CO₂ con la extensión de permafrost (%).

En vista de estos resultados, este trabajo aporta una revisión de las necesidades de investigación pendientes, ya que tiene en cuenta diferentes factores de predicción de escenarios futuros pendiente de resolver. Este es el primer paso para prever las consecuencias de la descongelación sobre los distintos medios afectados.

5. DISCUSIÓN

5.1. EL IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE:

La descongelación del permafrost puede convertirse en la gran amenaza del cambio climático y se debe afrontar como una emergencia global.

Si ocurre el escenario IPCC más catastrofista de la Figura 9, el RCP 8,5, habría un incremento de 2.6°C a 4.8°C y se habría reducido el 81% del área del permafrost. La liberación del COS de éste difiere de la de los incendios, la deforestación, la quema de combustibles fósiles, etc., al ocurrir en lugares remotos y lejos de la influencia directa humana. Como se ha descrito anteriormente, la era actual, el Antropoceno, se sustenta sobre los combustibles fósiles. La emisión de GEI, derivados del consumo de estos, está contribuyendo a la retroalimentación positiva de C (PCF), por la cual se amplifica la elevación de la temperatura terrestre y, consecuentemente, el cambio climático (Yang et al., 2010).

Los autores difieren en los posibles escenarios futuros, pero están de acuerdo en que el aumento de más de 2°C, y el deshielo que acarrea, alimentarán al engranaje imparable del cambio climático.

Con esta discusión, se completa el *Objetivo 1. Analizar la información disponible sobre las causas de la descongelación del permafrost asociadas al cambio climático.*

El permafrost se encuentra en una tendencia cambiante, lejos de su estado original y en un periodo sin precedentes en la dinámica global de los ecosistemas de la Tierra. Derivado de las condiciones climáticas actuales, nace un *ecosistema novel* en el cual está sucediendo el reemplazo, o en el caso más extremo, la desaparición de los servicios ecosistémicos del ecosistema histórico de referencia (Hobbs et al., 2006).

En el ecosistema de referencia, el permafrost proporciona servicios ecosistémicos, como por ejemplo (Euskirchen et al., 2013; Box et al., 2019):

1. Servicio de regulación. A escala global, el permafrost actúa como sumidero y fuente de COS. Éste influye en la regulación del clima, el ciclo hidrológico, el ciclo de C y la regulación de la erosión.
2. Servicio de soporte. Proporciona una estructura física sobre la cual se forma el suelo y se establecen los ecosistemas.
3. Servicio de aprovisionamiento. Permite a la población establecerse en zonas aisladas y obtener agua y alimentos.

4. Servicio cultural. Permite perpetuar la identidad territorial y mantener el estilo de vida tradicional, por ejemplo, la pesca tradicional o el almacenamiento de productos perecederos en profundidad para prolongar su conservación a baja temperatura.

Con la degradación de éste, hay una alteración en cascada de los servicios ecosistémicos como, por ejemplo;

1. Se perturba el régimen de incendios por las sequías extremas, secuela de la modificación de la red hídrica (asociado al servicio de regulación) (Nitze et al., 2018).
2. Se colapsan las infraestructuras humanas, los edificios o las vías de transporte (deterioro del servicio de soporte) (Pearce y Smit, 2013). También, desaparecen las rutas y las áreas donde la población indígena caza tradicionalmente (Bodeker, 2016; Werner et al., 2016).
3. Se agrava la vulnerabilidad de los seres vivos por la modificación de los ecosistemas, ocasionando la pérdida de biodiversidad y la escasez de recursos (vinculado al servicio de aprovisionamiento) (Bodeker, 2016).
4. Finalmente, la población de estas áreas se ve obligada a desplazarse en busca de un hábitat donde pueda establecerse sin sufrir los riesgos anteriores (perjuicio del servicio cultural) (Mosites et al., 2018; Strawa et al., 2020).

Antes de acontecer la pérdida de estos servicios ecosistémicos, se deben buscar estrategias de prevención o, en caso que el deterioro del servicio ya haya comenzado, se deben plantear medidas de mitigación del daño. Por ejemplo, Beer et al., (2020) realizaron un estudio donde usaban como estrategia de mitigación el aumento de la densidad de herbívoros. El pastoreo invernal de los animales compacta la nieve y reduce la eficacia de aislamiento térmico de ésta. Así, se permite una congelación más fría del suelo, llegando a retrasar la descongelación y todos los efectos asociados. Los resultados fueron que, al introducir grandes mamíferos en los ecosistemas de tundra, se puede evitar que un 37% del permafrost se descongele en todo el Ártico. Se aseguraría que, para 2100, permanezca un 80% con una temperatura promedio de menos de -4°C (Beer et al., 2020). La emisión de CH₄ de los herbívoros sería menor que si ocurriese la liberación del CH₄ almacenado en el permafrost (de Richter et al., 2018).

Una vez realizada esta discusión, se da por concluido el *Objetivo 2. Identificar la relación entre la descongelación y la pérdida de los servicios ecosistémicos.*

5.2. EL COSTE DE OPORTUNIDAD EN EL MEDIO SOCIOECONÓMICO

A las consecuencias del cambio climático se les puede dar un valor económico. Se puede cuantificar el coste de oportunidad para conocer los beneficios que se sacrifican al elegir una alternativa frente a otra (Duray, 2007); ¿cuánto le cuesta a la sociedad la quema de combustibles fósiles, la ganadería y la agricultura extensiva, la promoción de energías no renovables, la emisión de GEI, etc.?

El coste planteado a la alternativa sacrificante es la reducción del hielo, la elevación de hasta dos metros del nivel del mar, las condiciones de sequía, las extinciones masivas, etc.

Euskirchen et al., (2013) establece cuatro suposiciones para estimar los costes sociales del C liberado:

1. La trayectoria de emisiones. Si se acrecenta la cantidad global de C emitido se eleva la concentración de GEI en la atmósfera.
2. La sensibilidad climática. Si sube la temperatura se eleva la emisión de GEI.
3. La función de temperatura y daño. Referida al impacto económico por el aumento de la temperatura.
4. La tasa de reducción. El coste de oportunidad de invertir en la reducción de C a expensas de otras inversiones en producción.

Aplicando estas cuatro suposiciones, el mejor escenario es aquel donde la sensibilidad climática y los impactos por la subida de la temperatura son bajos, y donde hay una tasa de reducción de C alta. Se generaría un coste aproximado de 13 \$ tonelada⁻¹ de C emitido (Euskirchen et al., 2013).

En el escenario opuesto y más extremo, las emisiones, la sensibilidad climática y las temperaturas son altas y la tasa de reducción de C es baja. El importe asciende a 798 \$ tonelada⁻¹ de C emitido (Euskirchen et al., 2013).

Para el año 2100, Euskirchen et al., (2013) calcula que la liberación de C supondrá un coste de 102 mil millones de dólares a 1.9 billones de dólares. Larsen et al., (2008) calculan el costo de 5.6 a 7.6 mil millones de dólares; Hope y Schaefer (2016) establecen el impacto económico desde 3 a 166 billones de dólares. De no tomar medidas, el cambio climático puede costar a la economía mundial hasta un 5% del PIB (Stern, 2006).

5.2.1. IMPACTO ECONÓMICO EN INFRAESTRUCTURAS

Desde 1990, el cambio climático se ha convertido en un factor relevante en la ingeniería civil como estrategia para alargar la vida útil de las infraestructuras. Cuando las construcciones no tienen en cuenta este factor, tienen un mayor gasto en mantenimiento y en seguridad estructural (Prowse et al., 2009).

Existen técnicas para construir sobre el permafrost y reducir los riesgos (Rattanachot et al., 2015; Wang et al., 2016; Enríquez-de-Salamanca et al., 2017). Shiklomanov et al., (2017) estudiaron la ciudad rusa de Norilsk como ejemplo de un caso de construcción urbana masiva sobre permafrost. Norilsk cuenta con termosifones para consolidar las condiciones de congelación de las zonas aledañas a las tuberías, posee cimientos más profundos directamente sobre la roca madre, se extrae y se reemplaza el permafrost con material estable o se acelera el deshielo, eliminando la vegetación (Prowse et al., 2009).

Sin embargo, en mayo de 2020 tuvo lugar en Norilsk el colapso de un tanque de combustible por la inestabilidad causada por la descongelación del permafrost, enviando al Océano Ártico 200.000 toneladas de petróleo. El daño estimado es de 100.000 millones de dólares (Strawa et al., 2020).

Los costes acarreados por la descongelación incluyen la adaptación, la mitigación y los impactos económicos asociados (Yumashev et al., 2019). Se ven afectados el sector de la energía, el transporte, el suministro de materias primas, la construcción, etc. (Elias, 2017; Gamberg, 2020).

En el Ártico, el 70% de las infraestructuras están construidas sobre permafrost, y el 33% están en riesgo si se descongelan (Strawa et al., 2020). En 2050 habrá 3.6 millones de personas, lo equivalente a tres cuartos de la población del área del permafrost del hemisferio norte, afectadas por daños en infraestructuras como los asentamientos, los edificios, el transporte, la industria, las canalizaciones, etc. (Hjort et al., 2018).

Solo en Rusia, dos tercios del país están asentados sobre el permafrost, por lo que los daños por la descongelación supondrían una pérdida económica del 0.16% del PIB ruso (Porfiriev et al., 2019). La actividad extractiva de materias primas supone el 11% del PIB y la infraestructura de transporte un 7%. El importe de reparar estas infraestructuras supone 2,91 billones de dólares. En las regiones rusas ubicadas sobre el permafrost se localiza el 4% de la población del país, pero los gastos en reparaciones de estas zonas alcanzan el 7.5% del PIB (Streletskiy et al., 2019). Los

daños en infraestructuras por efectos del cambio climático alcanzarían los 5.5 mil millones de dólares en el escenario más catastrofista (RCP 8,5), pero si Rusia establece medidas de adaptación proactivas, puede reducirse el coste a 2.9 mil millones de dólares (Melvin et al., 2016).

Por otro lado, con la desaparición del hielo se crearán nuevas oportunidades económicas. Se favorecerá a la industria hidroeléctrica si hay una modificación en la magnitud, la estacionalidad y la duración de las crecidas de agua superficial (Whiteman et al., 2013). Se facilitará el acceso al 30% de las reservas potenciales de extracción de gas y a un 13% de las reservas petrolíferas (Whiteman et al., 2013). Además, se abrirán nuevas rutas de navegación por el deshielo, potenciando la competitividad de las zonas más aisladas, y por ende, desarrollando el turismo y el comercio marítimo (Löfbrand et al., 2020; Strawa et al., 2020)

La OTAN considera a la región del Ártico una zona de gran potencial por la obtención de recursos y por la ventaja geoestratégica. Por ejemplo, China quiere expandir su iniciativa Belt and Road (BRI) incluyendo una Ruta de la Seda Polar (Strawa et al., 2020).

Actualmente, en 2020, Estados Unidos ha identificado en el Refugio Nacional de Vida Silvestre del Ártico (declarado en 1980), donde se encuentra el hábitat de osos polares y pardos, lobos, caribús, zorros árticos y rojos, aves migratorias, etc., gran cantidad de recursos de petróleo y gas, de dónde se podrían extraer hasta 7,7 mil millones de barriles de petróleo (Elias, 2017).

Se debe considerar que estas nuevas oportunidades suponen un riesgo por la contaminación, la alteración de la vida marina o el aumento de la contaminación acústica, llevando a especies como la ballena de Groenlandia (*Balaena mysticetus*) a modificar sus rutas migratorias (Elias, 2017). Para combatir estos perjuicios, los gobiernos de Rusia y Canadá plantean cobrar una tasa por el paso a través de la Sea Route (NSR), denominado North West Passage (NWP) (Strawa et al., 2020).

5.2.2. IMPACTO SOCIOCULTURAL EN LA POBLACIÓN

El sector de la salud pública tiene el reto de asistir la vulnerabilidad ocasionada por el cambio climático (Mosites et al., 2018). Éste pone en riesgo servicios básicos como la seguridad alimentaria, el acceso al agua potable y a la red de saneamiento, la gestión de residuos, etc. Y a su vez, hace peligrar derechos fundamentales como la identidad cultural o el derecho de autodeterminación (Maldonado et al., 2014; Strawa et al.,

2020). Todo esto está causado por un clima impredecible, el deshielo del permafrost y la modificación de la red hídrica (Brubaker et al., 2011).

De hecho, ya hay poblaciones afectadas por las consecuencias del cambio climático. Concretamente, algunas no pueden permanecer en su región de origen y deben ser reubicadas por las instituciones gubernamentales. Estas poblaciones están sufriendo una crisis humanitaria y socioecológica sin precedentes (Larsen et al., 2008; Maldonado et al., 2014; Strawa et al., 2020).

La población indígena, que supone el 10% de la población del Ártico (incluyendo Noruega, Suecia, Finlandia, Dinamarca, Islandia, Canadá, Rusia y Estados Unidos), ha sido históricamente marginada política, económica y territorialmente (Bodeker, 2016).

La tribu aborígen de los Yup'ik, establecidos en Newtok (Alaska), se han visto forzados a abandonar su asentamiento por el agravamiento de la erosión costera y el termokarst (Strawa et al., 2020). La falta de infraestructuras, de un sistema de saneamiento, de una correcta gestión de residuos y la escasez de agua potable e higiene generan un riesgo sanitario. A esto se suma la pérdida de las condiciones culturales (como el detrimento de la caza y la pesca tradicional por la falta de hielo), que puede desembocar en estrés por la seguridad y el abastecimiento (Bronen, 2013; Himes-Cornell y Kasperski, 2015; Strawa et al., 2020).

Bronen (2013) establece los principios de la *climigración*, definida como *el desplazamiento continuo de la población causado por los cambios biofísicos inducidos por la alteración gradual del clima, combinado con eventos extremos e impactos severos*. En esta situación, no se puede aplicar el concepto de refugiado porque *está basado en un principio fundamental donde la persona necesita protección legal al estar fuera de su país por una persecución de un actor del gobierno o un actor que el gobierno no puede controlar* (Bronen, 2013).

Pero ¿de quién es la responsabilidad por el daño medio ambiental? ¿Quién debe ayudar económicamente a las poblaciones afectadas?

El segundo principio de la Declaración de Río de 1992 asume que los Estados tienen derecho a explotar sus recursos en aplicación de su propia política ambiental, y tienen la obligación de amparar las actividades llevadas a cabo dentro de su jurisdicción o bajo su control para no perjudicar al medio ambiente de otros Estados o zonas de fuera de su jurisdicción nacional (Borras et al., 2013; Maldonado et al., 2014).

Para estudiar la responsabilidad por el daño ambiental, la UNESCO creó la Lista del Patrimonio de la Humanidad en Peligro como instrumento para identificar las zonas más expuestas al cambio climático, y coordinar así una acción internacional para la adaptación e investigación. Por ejemplo, entran dentro de esta lista las barreras de coral, los parques naturales o incluso los glaciares. Se estudian los impactos que pueden darse en estas zonas como el deshielo, la pérdida de biodiversidad, la migración de especies, el aumento de la erosión, la elevación del nivel del mar, etc. (Bronen, 2013). Lamentablemente, en este listado no aparece el permafrost, o las áreas de referencia donde está presente, como elemento considerado en peligro, pese a las secuelas que supondrían su desaparición.

Para recibir fondos del gobierno se debe declarar el estado catastrófico, pero las políticas actuales de las instituciones solo proporcionan ayuda ante desastres ambientales extremos como terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, etc. Es preocupante que estas ayudas no cubran los eventos ecológicos sucedidos de forma gradual, como las inundaciones a largo plazo, las sequías, la erosión del terreno, la subsidencia de las capas del suelo, etc. (Maldonado et al., 2014).

Se debe considerar la relocalización cuando el cambio ecológico, gradual o externo, inducido por el clima, amenaza la vida de la comunidad y los métodos de control de la erosión y de las inundaciones no proporcionan protección (Maldonado et al., 2014). El apoyo de la población indígena es clave para tener éxito en la relocalización. La autodeterminación es un derecho fundamental que asegura a la comunidad indígena promover su propia identidad de acuerdo con sus tradiciones y/o costumbres, y empoderarse para tomar decisiones sobre asuntos internos y locales (UN Declaration on the Rights of indigenous People, 2007). Es vital integrar los principios de los derechos humanos en el marco político de la relocalización de la comunidad afectada con el fin de reforzar la resistencia y la resiliencia de la población (Maldonado et al., 2014).

Por ejemplo, en Alaska se han seleccionado los siguientes indicadores de vulnerabilidad socioecológica para identificar cuándo es necesaria la reubicación de una comunidad (Borras Pentinat, 2013):

- Pérdida repetitiva de infraestructuras. No hay capacidad para expandir la comunidad.
- Falta de vías de comunicación, agua potable, sistemas de saneamiento y gestión de residuos.

- Peligro para la comunidad por eventos ecológicos graduales o extremos repetidos. Se prevén modificaciones ambientales severas.
- Alto número de personas evacuadas.
- Fracaso repetido de medidas preventivas y mitigadoras del riesgo.
- Reducción del nivel socioeconómico.

Alaska es uno de los territorios más afectados por la descongelación del permafrost, y autores como Larsen et al., (2008) lo denominan *clima canario*, haciendo un símil con su fragilidad frente al cambio climático, como un ave en una mina ante la liberación de gas.

Hay distintos ejemplos de comunidades tribales reubicadas por el cambio climático. En la actualidad, ya está afectando a la ciudad de Kivalina (Alaska), con una población de 400 personas. Este asentamiento depende de la formación de hielo en el mar, que protege la isla y mitiga los efectos de las tormentas (Fritz et al., 2017). Al aumentar la temperatura, se reduce la superficie de hielo y una mayor parte de la superficie queda expuesta a la erosión (Maldonado et al., 2014; Werner et al., 2016).

Kivalina fue declarada zona catastrófica en 2005. En 2008, el ejército de Estados Unidos ayudó a construir una barrera de rocas para ayudar al control de la erosión. Sin embargo, el asentamiento ha sido inundado y erosionado agravando la seguridad alimentaria, afectando a la presencia de fauna o dificultando el método de conservación de alimentos en neveras excavadas en profundidad (Maldonado et al., 2014; Istomin y Habeck, 2016). En 2008, la población presentó una demanda colectiva contra 24 de las grandes empresas energéticas de Estados Unidos, entre ellas Shell o BP, donde argumentaban que al extraer recursos naturales como el petróleo, estaban agravando la erosión, el riesgo de inundaciones y la emisión de GEI (Maldonado et al., 2014). Los demandantes pedían una compensación económica por daños y perjuicios valorada desde 95 a 440 millones de dólares.

Desafortunadamente, en 2009 la demanda fue desestimada (Borras Pentinat, 2013). Esta decisión va en contra de uno de los principios fundamentales sobre prevención y reparación de daños ambientales, denominado principio de *quién contamina paga* (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2004). Cuando no es posible prever o mitigar un daño ambiental, se debe identificar al/los responsable/s para cuantificar el deterioro y asociar los aspectos significativos. La máxima dificultad en algunos casos, como la emisión de GEI antropológicos, es el carácter difuso del contaminante emitido. A esto, se suma el reto de cuantificar los GEI emitidos como consecuencia indirecta de la actividad humana, y resultantes de la descongelación del permafrost por el incremento

de la temperatura (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2004).

Las inundaciones producidas por el deshielo reducen la disponibilidad de agua potable, se destruye el almacén de comida y se daña la infraestructura pública (Bodeker, 2016). Esto determina un mayor riesgo de transmisión de enfermedades (Mosites et al., 2018), tanto infecciosas como patogénicas, por la liberación de virus latentes (Oliva y Fritz, 2018).

Estas poblaciones desaparecerían por efecto de la erosión en 10 o 15 años, y el presupuesto para la relocalización sería de 80 a 200 millones de dólares americanos (Maldonado et al., 2014). Desde 1983 a 1989, el estado de Alaska gastó 1.5 millones de dólares en el control de la erosión (Maldonado et al., 2014).

Finalmente, con la realización del análisis de las implicaciones socioculturales y económicas, que supone la descongelación, se alcanza el *Objetivo 3. Estimar el coste de oportunidad de las poblaciones afectadas por la descongelación.*

6. CONCLUSIÓN

El Antropoceno, como concepto de nueva era geológica, está desarrollándose sobre los cimientos de los combustibles fósiles y el consumo de los recursos naturales. La globalización, la transformación de los usos del suelo y la pérdida de la biodiversidad generan cambios impredecibles en la dinámica y el funcionamiento de los ecosistemas. Como resultado, aumenta la temperatura, se acidifican los océanos, se descongelan los glaciares, se deshiela el permafrost y se extinguen multitud de especies, reduciendo la biodiversidad y la densidad poblacional.

Tras el exhaustivo análisis realizado en este trabajo, se concluye que:

1. Las emisiones de GEI son difíciles de observar y calcular. Sin embargo, a la hora de cuantificar la emisión de COS del permafrost, muchos autores no diferencian entre CO_2 y CH_4 . Solo el 43% de las referencias bibliográficas analizadas realizan esta distinción, siendo de vital importancia, al ser el PC_{100} del CH_4 de media, 28 veces mayor que el del CO_2 .

Se debería emplear estrictamente esta diferenciación en el ámbito científico y legislativo para poder aplicar el principio de *quien contamina paga*, al no ser equitativos los valores de PC_{100} de ambos gases y, por tanto, tampoco sus efectos. A su vez, gracias a diferenciarlos, se permitiría describir las interacciones del deshielo, se prevendrían las alteraciones en los ecosistemas y se pronosticarían los escenarios futuros de forma más veraz.

2. La desaparición del permafrost provoca una perturbación en el ecosistema. Se originan unas condiciones ambientales que difieren de las del ecosistema histórico de referencia. Tienen lugar sequías e inundaciones, la modificación del paisaje, la creación de nuevas barreras físicas como lagos o colapsos, la intensificación del régimen de incendios, la erosión térmica o termokarst, la reducción de la biodiversidad por la extinción de las especies, etc. No obstante, a pesar de la pérdida de algunos servicios ecosistémicos históricos, también se abre la puerta a nuevas posibilidades. Debe hacerse énfasis en planificar la explotación sostenible de los servicios ecosistémicos históricos y nóveles. La descongelación supone una ventaja competitiva al abrir nuevas rutas de transporte, facilitar la accesibilidad a zonas remotas, permitir la explotación de recursos petrolíferos que antes eran inaccesibles, etc.

Es necesaria la cooperación entre gobiernos para regular el acceso sostenible a los recursos disponibles. Si se quiere evitar la militarización y el monopolio de éstos, se deben pactar entre los gobiernos medidas legislativas de explotación, la definición de santuarios para la fauna, la declaración de reservas naturales o la inclusión de las áreas donde al descongelarse el permafrost son accesibles recursos que antes eran inalcanzables, como nuevas fuentes de extracción de gas y petróleo. En definitiva deben acordarse medidas para perpetuar y asegurar el mantenimiento de los servicios ecosistémicos.

3. El coste de oportunidad de la población se mide en función de los medios de los que dispone (infraestructuras) y del estado sociocultural.

En 2050 habrá 3.6 millones de personas afectadas y para el año 2100 el impacto económico del cambio climático será de 3 a 166 billones de dólares. Para entonces, parte de la población no tendrá acceso al agua potable, a la seguridad alimentaria, a un sistema de saneamiento e higiene, a la gestión de residuos, etc.

El coste sociocultural de las comunidades compromete el abandono del hogar por exponerse a un riesgo ambiental, consecuencia del cambio climático. Los integrantes de la comunidad se convierten en refugiados aunque, paradójicamente, la actual legislación no incluye a estos colectivos bajo esta denominación.

El cambio climático no entiende de fronteras. Existen fondos para la mitigación de los eventos extremos, pero no para aquellos que suceden de forma gradual a largo plazo. La problemática es la ausencia de un protocolo para la reubicación de la comunidad que habita la zona afectada hasta otra con menor riesgo.

Respecto al gasto en las infraestructuras, para manejar con éxito los impactos de la descongelación se debe estudiar cuáles pueden verse afectadas, dónde se localizan y cómo se deben implementar medidas de prevención y adaptación.

4. Las futuras líneas de investigación deben enfocarse en:

4.1. La incertidumbre de datos. Los expertos coinciden en que no hay suficientes bases de datos de laboratorio y de campo debido a la difícil accesibilidad de las zonas de muestreo. Se deben invertir fondos en la medición del estado del permafrost para poder predecir los escenarios futuros.

4.2. La ausencia de cartografía. Las imágenes de satélite y los estudios más recientes observan récords de pérdida de hielo en las masas glaciares, pero no existen estudios rigurosos respecto a la modificación del área del permafrost. Gracias a la obtención de datos se podrá plasmar en la cartografía información tan relevante como riesgos de inundaciones y una

proyección a largo plazo para, por ejemplo, prevenir a la población afectada y reubicarla en zonas seguras.

- 4.3.** La despreocupación de los gobiernos. Es una obligación gubernamental, tanto de los países afectados directamente como de los que no, desarrollar soluciones legislativas y las estrategias para controlar el aumento de la temperatura media global. La restricción de las emisiones de GEI y la inversión en lograr la mejor tecnología disponible para su medición, son la máxima prioridad para poder predecir y regular la actual tasa de emisión permitida.

Para concluir, se recalca una vez más, la relevancia del permafrost en la dinámica global y en la regulación de los servicios ecosistémicos. El énfasis del presente documento es divulgar el papel del permafrost, la carencia de información existente en el mundo científico y la necesidad de inversión, tanto divulgativa, legislativa, social y económica, por parte de los fondos públicos. La coordinación entre las instituciones gubernamentales y la coherencia de las presiones antrópicas sobre el ecosistema, son vitales para lograr el desarrollo sostenible de las actividades humanas.

7. BIBLIOGRAFIA

- Abbott, B.W., Jones, J.B. 2015. Permafrost collapse alters soil carbon stocks, respiration, CH₄, and N₂O in upland tundra. *Global Change Biology* 21: 4570-4587.
- Alba, S., Alcázar, M., Cermeño, F., Barbero, F. 2011. Erosión Y Manejo Del Suelo. Importancia Del Laboreo Ante Los Procesos Erosivos Naturales Y Antrópicos. *Agricultura Ecológica* 7: 13-38.
- Beer, C., Zimov, N., Olofsson, J., Porada, P., Zimov, S. 2020. Protection of Permafrost Soils from Thawing by Increasing Herbivore Density. *Scientific Reports* 10: 1-10.
- Berteaux, D., Gauthier, G., Domine, F., Ims, R.A., Lamoureux, S.F., Lévesque, E., Yoccoz, N. 2017. Effects of changing permafrost and snow conditions on tundra wildlife: critical places and times. *Arctic Science* 3: 65-90.
- Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., Matthes, H., Vieira, G., Streletskiy, D.A., Schoeneich, P. et al. 2019. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications* 10: 1-11.
- Bodeker, G. 2016. *Health Care of Indigenous Peoples/Nations*. Second Edi. Elsevier.
- Borras Pentinat, S. 2013. La justicia climática: entre la tutela y la fiscalización de las responsabilidades. *Anuario Mexicano de Derecho Internacional* 13: 3-49.
- Box, J.E., Colgan, W.T., Christensen, T.R., Schmidt, N.M., Lund, M., Parmentier, F.J.W., Brown, R. et al. 2019. Key indicators of Arctic climate change: 1971-2017. *Environmental Research Letters* 14: .
- Bronen, R. 2013. Climate Induced Community Relocations: Creating an Adaptive Governance Framework.
- Brown, J., O.J. Ferrians, Jr., J.A. Heginbottom, E.S. Melnikov 1997. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. *Washington, DC: U.S. Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources. Circum-Pacific Map Series CP-45, 1:10,000,000*.
- Brubaker, M., Berner, J., Chavan, R., Warren, J. 2011. Climate change and health effects in Northwest Alaska. *Global health action* 4: .
- Burke, E.J., Ekici, A., Huang, Y., Chadburn, S.E., Huntingford, C., Ciais, P., Friedlingstein, P. et al. 2017. Quantifying uncertainties of permafrost carbon-climate feedbacks. *Biogeosciences Discussions* 1-42.
- Chen, Y., Liu, A., Moore, J.C. 2020. Mitigation of Arctic permafrost carbon loss through stratospheric aerosol geoengineering. *Nature Communications* 11: 1-10.

- Davidson, E.A., Janssens, I.A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440: 165-173.
- Duray, Q.M.H. 2007. Environmental Economics for Tree Huggers and Other Skeptics. *Journal of Economic Issues* 41: 1180-1182.
- Elberling, B., Michelsen, A., Schädel, C., Schuur, E.A.G., Christiansen, H.H., Berg, L., Tamstorf, M.P., Sigsgaard, C. 2013. Long-term CO₂ production following permafrost thaw. *Nature Climate Change* 3: 890-894.
- Elias, S.A. 2017. *Conservation issues: Tundra ecosystems*. Elsevier Inc.
- Enríquez-de-Salamanca, Á., Díaz-Sierra, R., Martín-Aranda, R.M., Santos, M.J. 2017. Environmental impacts of climate change adaptation. *Environmental Impact Assessment Review* 64: 87-96.
- Euskirchen, E.S., Goodstein, E.S., Huntington, H.P. 2013. An estimated cost of lost climate regulation services caused by thawing of the Arctic cryosphere. *Ecological Applications* 23: 1869-1880.
- Fan, Z., Neff, J.C., Harden, J.W., Zhang, T., Veldhuis, H., Czimczik, C.I., Winston, G.C., O'Donnell, J.A. 2011. Water and heat transport in boreal soils: Implications for soil response to climate change. *Science of the Total Environment* 409: 1836-1842.
- Fritz, M., Vonk, J.E., Lantuit, H. 2017. Collapsing Arctic coastlines. *Nature Climate Change* 7: 6-7.
- Gamberg, M. 2020. *Threats to Arctic Ecosystems*. Elsevier Inc.
- Gariano, S.L., Guzzetti, F. 2016. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews* 162: 227-252.
- González-Eguino, M., Neumann, M.B. 2016. Significant implications of permafrost thawing for climate change control. *Climatic Change* 136: 381-388.
- Hartemink, A.E. 2016. *The definition of soil since the early 1800s*. Elsevier Inc.
- Hayes, D.J., Kicklighter, D.W., McGuire, A.D., Chen, M., Zhuang, Q., Yuan, F., Melillo, J.M., Wulfschleger, S.D. 2014. The impacts of recent permafrost thaw on land-atmosphere greenhouse gas exchange. *Environmental Research Letters* 9: .
- Himes-Cornell, A., Kasperski, S. 2015. Assessing climate change vulnerability in Alaska's fishing communities. *Fisheries Research* 162: 1-11.
- Hjort, J., Karjalainen, O., Aalto, J., Westermann, S., Romanovsky, V.E., Nelson, F.E., Etzelmüller, B., Luoto, M. 2018. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by

- mid-century. *Nature Communications* 9.
- Hobbs, R.J., Arico, S., Aronson, J., Baron, J.S., Bridgewater, P., Cramer, V.A., Epstein, P.R. et al. 2006. Novel ecosystems: Theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Global Ecology and Biogeography* 15: 1-7.
- Hodgkins, S.B., Tfaily, M.M., McCalley, C.K., Logan, T.A., Crill, P.M., Saleska, S.R., Rich, V.I., Chanton, J.P. 2014. Changes in peat chemistry associated with permafrost thaw increase greenhouse gas production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111: 5819-5824.
- Hope, C., Schaefer, K. 2016. Economic impacts of carbon dioxide and methane released from thawing permafrost. *Nature Climate Change* 6: 56-59.
- Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J.W., Schuur, E.A.G., Ping, C.L., Schirrmeister, L. et al. 2014. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences* 11: 6573-6593.
- International Permafrost Association. The Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). Disponible en: <https://ipa.arcticportal.org/products/gtn-p> [Accedido 25 de septiembre de 2020].
- IPCC. 2014. *Cambio climático 2014: Informe de Síntesis*.
- IPCC. 1996. Climate Change 1995: A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Environmental Science & Technology* 48: 4596-4603.
- Istomin, K. V., Habeck, J.O. 2016. Permafrost and indigenous land use in the northern Urals: Komi and Nenets reindeer husbandry. *Polar Science* 10: 278-287.
- Jansson, J.K., Taş, N. 2014. The microbial ecology of permafrost. *Nature Reviews Microbiology* 12: 414-425.
- Jorgenson, M.T., Romanovsky, V., Harden, J., Shur, Y., Donnell, J.O., Schuur, E.A.G., Kanevskiy, M. 2010. Resilience and vulnerability of permafrost to climate change. *Canadian Journal of Forest Research* 40.
- Kanevskiy, M., Shur, Y., Krzewinski, T., Dillon, M. 2013. Structure and properties of ice-rich permafrost near Anchorage, Alaska. *Cold Regions Science and Technology* 93: 1-11.
- Koven, C.D., Ringeval, B., Friedlingstein, P., Ciais, P., Cadule, P., Khvorostyanov, D., Krinner, G., Tarnocai, C. 2011. Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108: 14769-14774.

- Larsen, P.H., Goldsmith, S., Smith, O., Wilson, M.L., Strzepek, K., Chinowsky, P., Saylor, B. 2008. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change. *Global Environmental Change* 18: 442-457.
- Lefevre, C.; Rekik, F.; Alcantara, V.; Wiese, L. 2017. *Potencial Oculto*.
- Lewkowicz, A.G., Way, R.G. 2019. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment. *Nature Communications* 10: 1-11.
- Lövbrand, E., Mobjörk, M., Söder, R. 2020. The Anthropocene and the geo-political imagination: Re-writing Earth as political space. *Earth System Governance* 4: 100051.
- Maldonado, J.K., Colombi, B., Pandya, R. 2014. Climate change and indigenous peoples in the United States: Impacts, experiences and actions. *Climate Change and Indigenous Peoples in the United States: Impacts, Experiences and Actions* 1-174.
- Maltini, F. 2015. *The implications of climate change and energy security for global electricity supply: The Energy (R)evolution*. Elsevier Ltd.
- Martínez, E., Castillo, D.E.L., Serrano-notivoli, R., Novak, K., Sánchez, M.A. 2012. Cuantificación de los gradientes climáticos altitudinales en la vertiente norte del Macizo del Moncayo a partir de una nueva red de estaciones automáticas en altura. *Cambio Climático: Extremos e impactos* 465: 519–528.
- Markkula, I., Turunen, M., Rasmus, S. 2019. A review of climate change impacts on the ecosystem services in the Saami Homeland in Finland. *Science of the Total Environment* 692: 1070-1085.
- Melvin, A.M., Larsen, P., Boehlert, B., Neumann, J.E., Chinowsky, P., Espinet, X., Martinich, J. et al. 2017. Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 114: E122-E131.
- Mondav, R., Woodcroft, B.J., Kim, E.H., Mccalley, C.K., Hodgkins, S.B., Crill, P.M., Chanton, J. et al. 2014. Discovery of a novel methanogen prevalent in thawing permafrost. *Nature Communications* 5: 1-7.
- Mosites, E., Lujan, E., Brook, M., Brubaker, M., Roehl, D., Tcheripanoff, M., Hennessy, T. 2018. Environmental observation, social media, and One Health action: A description of the Local Environmental Observer (LEO) Network. *One Health* 6: 29-33.
- Muster, S., Langer, M., Abnizova, A., Young, K.L., Boike, J. 2015. Spatio-temporal sensitivity of MODIS land surface temperature anomalies indicates high potential for large-scale land cover change detection in Arctic permafrost landscapes. *Remote Sensing of Environment* 168: 1-12.

- Natali, S.M., Schuur, E.A.G., Rubin, R.L. 2012. Increased plant productivity in Alaskan tundra as a result of experimental warming of soil and permafrost. *Journal of Ecology* 100: 488-498.
- Nauta, A.L., Heijmans, M.M.P.D., Blok, D., Limpens, J., Elberling, B., Gallagher, A., Li, B. et al. 2015. Permafrost collapse after shrub removal shifts tundra ecosystem to a methane source. *Nature Climate Change* 5: 67-70.
- Nitzbon, J., Westermann, S., Langer, M., Martin, L.C.P., Strauss, J., Laboor, S., Boike, J. 2020. Fast response of cold ice-rich permafrost in northeast Siberia to a warming climate. *Nature Communications* 11: 1-11.
- Nitze, I., Grosse, G., Jones, B.M., Romanovsky, V.E., Boike, J. 2018. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic. *Nature Communications* 9: 1-11.
- Oliva, M., Fritz, M. 2018. Permafrost degradation on a warmer Earth: Challenges and perspectives. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 5: 14-18.
- Parikh, S.J. and James, B.R. (2012) Soil The Foundation of Agriculture. Nature Education Knowledge, 3, 2. - References - Scientific Research Publishing. Disponible en: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1323842](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1323842) [Accedido 25 de septiembre de 2020a].
- PARLAMENTO EUROPEO Y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA. 2004. Directiva (UE) 2004/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre responsabilidad ambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales. *Diario Oficial de la Unión Europea L 143*: 56-75.
- Pearce, T., Smit, B. 2013. *Vulnerability and Adaptation to Climate Change in the Canadian Arctic*. Elsevier.
- Ping, C.L., Jastrow, J.D., Jorgenson, M.T., Michaelson, G.J., Shur, Y.L. 2015. Permafrost soils and carbon cycling. *Soil* 1: 147-171.
- Plaza, C., Pegoraro, E., Bracho, R., Celis, G., Crummer, K.G., Hutchings, J.A., Hicks Pries, C.E. et al. 2019. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra. *Nature Geoscience* 12: 627-631.
- Porfiriev, B.N., Eliseev, D.O., Streletskiy, D.A. 2019. Economic Assessment of Permafrost Degradation Effects on Road Infrastructure Sustainability under Climate Change in the Russian Arctic. *Herald of the Russian Academy of Sciences* 89: 567-576.
- Potapowicz, J., Szumińska, D., Szopińska, M., Polkowska, Ż. 2019. The influence of global climate change on the environmental fate of anthropogenic pollution released from the

- permafrost: Part I. Case study of Antarctica. *Science of the Total Environment* 651: 1534-1548.
- Prowse, T.D., Furgal, C., Chouinard, R., Melling, H., Milburn, D., Smith, S.L. 2009. Implications of climate change for economic development in Northern Canada: Energy, resource, and transportation sectors. *Ambio* 38: 272-281.
- Rattanachot, W., Wang, Y., Chong, D., Suwansawas, S. 2015. Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change. *Transport Policy* 41: 159-166.
- Reyes, A. V., Froese, D.G., Jensen, B.J.L. 2010. Permafrost response to last interglacial warming: Field evidence from non-glaciated Yukon and Alaska. *Quaternary Science Reviews* 29: 3256-3274.
- de Richter, R., Caillol, S., Ming, T. 2018. *Geoengineering: Sunlight reflection methods and negative emissions technologies for greenhouse gas removal*. Elsevier Inc.
- Saulnier-Talbot, É., Lavoie, I. 2018. Uncharted waters: the rise of human-made aquatic environments in the age of the "Anthropocene". *Anthropocene* 23: 29-42.
- Schädel, C., Bader, M.K.F., Schuur, E.A.G., Biasi, C., Bracho, R., Capek, P., De Baets, S. et al. 2016. Potential carbon emissions dominated by carbon dioxide from thawed permafrost soils. *Nature Climate Change* 6: 950-953.
- Schädel, C., Schuur, E.A.G., Bracho, R., Elberling, B., Knoblauch, C., Lee, H., Luo, Y. et al. 2014. Circumpolar assessment of permafrost C quality and its vulnerability over time using long-term incubation data. *Global Change Biology* 20: 641-652.
- Schaefer, K.M., Lantuit, H., Romanovsky, V.E., Schuur, E.A.G. 2012. Policy implications of warming permafrost. *United Nations Environment Programme Special Report* 50.
- Schaefer, K., Lantuit, H., Romanovsky, V.E., Schuur, E.A.G., Witt, R. 2014. The impact of the permafrost carbon feedback on global climate. *Environmental Research Letters* 9.
- Schaphoff, S., Heyder, U., Ostberg, S., Gerten, D., Heinke, J., Lucht, W. 2013. Contribution of permafrost soils to the global carbon budget. *Environmental Research Letters* 8: .
- Schuur, E.A.G., Abbott, B. 2011. Climate change: High risk of permafrost thaw. *Nature* 480: 32-33.
- Schuur, E.A.G., Abbott, B.W., Bowden, W.B., Brovkin, V., Camill, P., Canadell, J.G., Chanton, J.P. et al. 2013. Expert assessment of vulnerability of permafrost carbon to climate change. *Climatic Change* 119: 359-374.
- Schuur, E.A.G., MacK, M.C. 2018. Ecological response to permafrost thaw and consequences for local and global ecosystem services. *Annual Review of Ecology, Evolution, and*

- Systematics* 49: 279-301.
- Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J., Hugelius, G. et al. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature* 520: 171-179.
- Schuur, E.A.G., Vogel, J.G., Crummer, K.G., Lee, H., Sickman, J.O., Osterkamp, T.E. 2009. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra. *Nature* 459: 556-559.
- Shiklomanov, N.I., Streletskiy, D.A., Grebenets, V.I., Suter, L. 2017. Conquering the permafrost: urban infrastructure development in Norilsk, Russia. *Polar Geography* 40: 273-290.
- Sistla, S.A., Moore, J.C., Simpson, R.T., Gough, L., Shaver, G.R., Schimel, J.P. 2013. Long-term warming restructures Arctic tundra without changing net soil carbon storage. *Nature* 497: 615-617.
- Stern, N. 2006. *La economía del cambio climático: Resumen Ejecutivo*.
- Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P., McNeill, J. 2011. The anthropocene: Conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369: 842-867.
- Strawa, B.A.W., Latshaw, G., Farkas, S., Russell, P. 2020. Arctic Ice Loss Threatens National Security: A Path Forward. *Orbis* 64: 622-636.
- Streletskiy, D.A., Suter, L.J., Shiklomanov, N.I., Porfiriev, B.N., Eliseev, D.O. 2019. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters* 14.
- Tamocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G., Zimov, S. 2009. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23: 1-11.
- Tanski, G., Lantuit, H., Ruttor, S., Knoblauch, C., Radosavljevic, B., Strauss, J., Wolter, J. et al. 2017. Transformation of terrestrial organic matter along thermokarst-affected permafrost coasts in the Arctic. *Science of the Total Environment* 581-582: 434-447.
- United Nations Declaration on the Rights of Indigenous Peoples | United Nations For Indigenous Peoples. Disponible en: <https://www.un.org/development/desa/indigenouspeoples/declaration-on-the-rights-of-indigenous-peoples.html> [Accedido 25 de septiembre de 2020].
- Walter Anthony, K., Schneider von Deimling, T., Nitze, I., Frolking, S., Emond, A., Daanen, R., Anthony, P. et al. 2018. 21st-Century Modeled Permafrost Carbon Emissions Accelerated By Abrupt Thaw Beneath Lakes. *Nature Communications* 9: .

- Wang, Y., Jin, H., Li, G. 2016. Investigation of the freeze-thaw states of foundation soils in permafrost areas along the China-Russia Crude Oil Pipeline (CRCOP) route using ground-penetrating radar (GPR). *Cold Regions Science and Technology* 126: 10-21.
- Weiss, N., Blok, D., Elberling, B., Hugelius, G., Jørgensen, C.J., Siewert, M.B., Kuhry, P. 2016. Thermokarst dynamics and soil organic matter characteristics controlling initial carbon release from permafrost soils in the Siberian Yedoma region. *Sedimentary Geology* 340: 38-48.
- Werner, K., Fritz, M., Morata, N., Keil, K., Pavlov, A., Peeken, I., Nikolopoulos, A. et al. 2016. Arctic in Rapid Transition: Priorities for the future of marine and coastal research in the Arctic. *Polar Science* 10: 364-373.
- Whiteman, G., Hope, C., Wadhams, P. 2013. Vast coasts of Arctic change - methane released by melting permafrost will have global impacts. *Nature Comment* 2012: .
- Xiao, C. De, Wang, S.J., Qin, D.H. 2015. A preliminary study of cryosphere service function and value evaluation. *Advances in Climate Change Research* 6: 181-187.
- Xue, X., Guo, J., Han, B., Sun, Q., Liu, L. 2009. The effect of climate warming and permafrost thaw on desertification in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Geomorphology* 108: 182-190.
- Yang, Z., Ou, Y.H., Xu, X., Zhao, L., Song, M., Zhou, C. 2010. Effects of permafrost degradation on ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* 30: 33-39.
- Yumashev, D., Hope, C., Schaefer, K., Riemann-Campe, K., Iglesias-Suarez, F., Jafarov, E., Burke, E.J. et al. 2019. Climate policy implications of nonlinear decline of Arctic land permafrost and other cryosphere elements. *Nature Communications* 10: 1-11.
- Zerefos, C.S., Repapis, C., Giannakopoulos, C., Kapsomenakis, J., Papanikolaou, D., Papanikolaou, M., Poulos, S., Vrekoussis, M., Philandras, C., Tselioudis, G., Gerasopoulos, E., Douvis, C., Diakakis, M., Nastos, P., Hadjinicolaou, P., Xoplaki, E., Luterbacher, J., Zanis, P., Tzedakis, P.C., Founda, D., Eleftheratos, K., Repapis, K., 2011. The climate of the Eastern Mediterranean and Greece: past, present and future. *The Environmental, Economic and Social Impacts of Climate Change in Greece. Bank of Greece, Athens*, 1–126.
- Zhang, T., Barry, R.G., Knowles, K., Heginbottom, J.A., Brown, J. 2008. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere. *Polar Geography* 31: 47-68.